

인바재료의 기계적 성질에 미치는 풀림 열처리와 시험온도의 영향

원시태*, 김종호*

The Effects of the Annealing Heat Treatments and Testing Temperatures on the Mechanical Properties of the Invar Materials

Si Tae Won*, Jong Ho Kim*

ABSTRACT

The effects of heat treatments and testing temperatures on the mechanical properties of Invar materials were investigated through experiments, which can influence the formability in metal forming fields. Annealing temperatures were changed from 900°C to 1200°C with an increment of 100°C under two different furnace atmosphere(vacuum and H₂ gas). Microstructure and hardness tests were performed for annealed specimens at room temperature(RT) and tensile tests were also performed by changing annealing temperatures as well as testing temperatures from RT to 300°C. The grain size of annealed materials increased with increasing annealing temperature, while micro-hardness distributions showed almost same hardness values regardless of annealing temperature. Strength ratio (tensile/yield strength), which influences the forming characteristics of sheet metal, remained almost constant for various experimental conditions in case of unannealed specimens. However, it showed increasing tendency with increasing both annealing and testing temperatures, particularly at the testing temperature higher than 200°C. Therefore it can be concluded that press formability of fully-annealed Invar material can be improved by warm forming technique.

Key Words : Invar Material(인바 재료), Annealing Heat Treatment(풀림 열처리), Testing Temperature(시험온도), Strength Ratio(강도비)

1. 서론

Fe-Ni계 합금의 중요한 성질 중 하나는 온도상승과 더불어 원자진동은 열팽창을, 자기스핀 배열은 강자성 배열에서 상자성 배열로 변함에 따라 열수축현상을 일으키며 이들 사이의 균형에 의해 낮

은 열팽창계수를 갖는 것으로 알려져 있으며, 특히 Fe-Ni계 합금중 선열팽창계수가 철강재료의 약 1/10인 $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 가장 낮은 Fe-36%Ni 합금이 인바재료이다.^(1, 2) 그러나 인바소재는 제조방법⁽³⁾ 첨가 성분^(4, 5), 열처리방법^(6, 7, 8) 및 가공방법^(9, 10)등에 따라 성질이 상당히 변화하는 특성을 갖고 있기

2001년 7월 6일 접수

* 서울산업대학교 금형설계학과

때문에 인바 소재에 대한 기존의 연구결과는 이들 방법에 의한 선열팽창계수등 치수 변화와 관련한 연구가 대부분이다.

또한 인바소재는 낮은 선열팽창계수를 갖는 특징으로 인하여 주로 측정용 장비의 소재로 사용되어 왔으나, 적절한 고강도와 고인성의 특성을 갖고 있어서 현재는 작동 온도하에서 장시간 사용하는 측정장비의 스크린이나 TV브라운관 내부의 Shadow Mask^(11, 12)등과 같이 전기, 전자재료 및 정밀기기 부품의 용도로 널리 이용이 확대되고 있는 실정이다. 그러나 인바소재는 기존에 사용되어 왔던 순철에 비해 항복강도는 2배이상 강하고, 연신율은 1/2배 정도이며 특히 강한 스프링백과 과탄특성을 갖기 때문에 제품 성형시에는 터짐이나 뒤틀림등의 많은 문제점이 발생하고 있다.

한편 스테인레스나 Ti합금등과 같은 난성형재료는 열간과 냉간의 중간 온도범위인 온간온도에서 성형작업을 행하면 후처리 가공이 거의 필요없을 정도의 정밀한 제품을 가공할 수 있기 때문에 많은 연구자들이 온간성형법^(13, 14, 15)에 관심을 갖고 있다.

이상과 같은 관점에서 인바재료의 성형성 향상을 위한 풀림열처리방법과 시험온도에 따른 특성과 약은 매우 중요하다고 생각되며 전보⁽¹⁶⁾에서는 먼저 인바소재를 진공 및 수소분위기에서 풀림온도 및 열처리 사이클을 변화시킨 후 상온에서의 기계적 성질을 검토하였다. 이 결과 900℃ 이상의 풀림온도에서 풀림처리한 인바소재는 미풀림재에 비해 인장강도는 약 10.0~14.4%, 항복강도는 약 34.6~39.1% 저하시켜 강도비를 미풀림재의 1.2~1.3으로부터 1.7~1.8로 향상시키고, 굽힘시험결과 스프링백 각도는 미풀림재의 약1/2로 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서는 인바소재를 전보⁽¹⁶⁾에서와 같이 동일한 방법으로 풀림처리를 행한 후, 온간의 시험온도 영역에서 인바소재의 기계적 성질은 어떠한 특성을 갖는가에 대하여 검토하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험재료 및 시험편제작

본 실험에 사용한 인바소재의 화학성분은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical compositions of Invar(wt.%)

Composition Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Fe
INVAR	0.003	0.04	0.31	0.001	0.001	36.1	bal.

인바소재의 기계적 성질을 얻기 위한 인장시험편의 형상과 규격은 Fig. 1과 같고, 시험편의 동일 규격화를 위해 Fig. 2와 같이 금형을 제작하여 프레스에서 블랭킹 가공하였다.

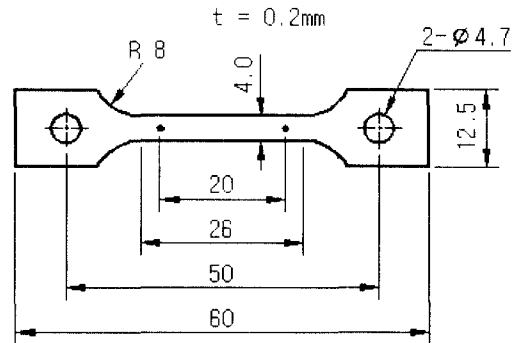


Fig. 1 Geometry of tensile test specimen

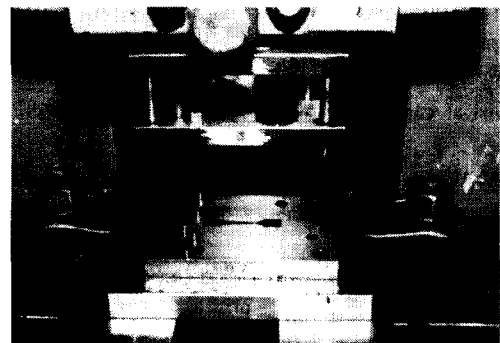


Fig. 2 Blanking die for tensile test specimen

인장시험은 Fig.3과 같이 가열챔버[Model SF868E, 최대온도 1000℃]가 부착된 Instron인장시험기[Model 8516]를 이용하였고, 시험속도는 5mm/min.로 하였다. 이때 시험온도는 상온(20℃)과 함께 Fe-36%Ni합금의 재결정온도인 500℃의 0.16배, 0.3배, 0.4배 및 0.6배인 80℃, 150℃, 200℃ 및 300℃의 5종류를 선정하였다.

또한 풀림처리재의 방향성을 검토하기 위하여

압연방향(0°), 압연에 45° 방향(45°) 및 압연 직각 방향(90°)의 3종류를 선정하였다.

폴림처리재의 경도값은 마이크로 비커스 경도 시험기를 사용하여 0.1kgf의 하중으로 측정하였다.

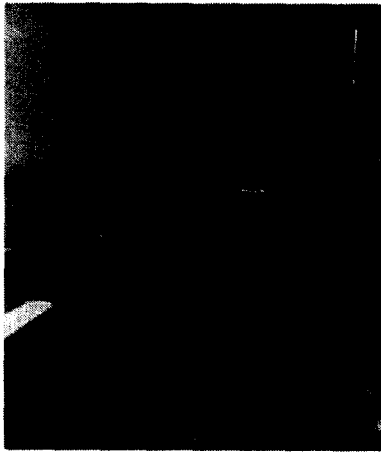


Fig. 3 Tensile test machine

2.2 폴림 열처리방법 및 조직관찰방법

인바소재의 수소 분위기 폴림 열처리는 Fig.4와 같은 분위기 열처리로를 이용하여 순도 99.99%를 갖는 수소가스를 가스주입구를 통하여 10분간 로안에 공급하여 로안의 잔여공기를 충분히 제거(flushing)한 후, 수소가스의 폭발위험성을 방지하기 위하여 가스배기구에서 배출되는 수소가스는 연소시키면서 열처리하였다. 이때 가열, 유지 및 냉각과정시 수소가스는 2ℓ/min.의 속도로 로안에 계속 주입하여 수소분위기를 유지하였다. 한편 진공열처리는 제작된 시험편을 석영관을 이용하여 10^{-4} Torr의 진공분위기를 만든 후 봉입하여 열처리로에서 폴림처리하였다. Fig.5는 진공분위기 상태를 만든 석영관의 모양을 나타낸 것이다.

폴림처리 온도는 Fe-36%Ni합금의 재결정온도가 약 500℃이고, 용융온도가 약 1450℃이기 때문에⁽¹⁷⁾ 재결정온도의 1.8배, 2.0배, 2.2배 및 2.4배인 900℃, 1000℃, 1100℃, 1200℃의 4종류의 온도에서 18분 유지 후 로냉시켰다.

한편 폴림처리 후의 조직관찰은 금속현미경에서 100배의 배율로 관찰하였고 사용한 부식액은 염

산(3)+질산(1)의 혼합액을 이용하였다.

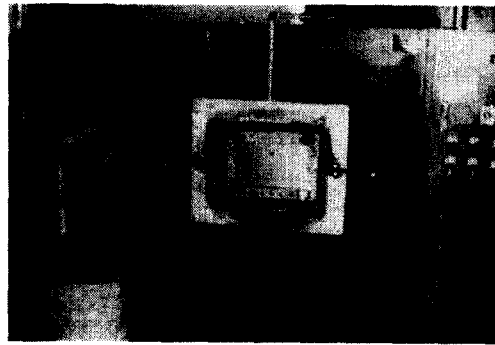


Fig. 4 Furnace for annealing heat treatment

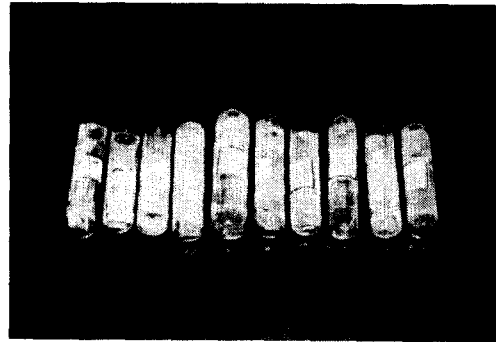


Fig. 5 Quartz glass tubes for vacuum annealing heat treatment

3. 실험결과 및 고찰

3.1 폴림열처리조건과 조직과의 관계

Fig.6은 미폴림처리 인바소재의 현미경 조직사진으로 결정립이 상당히 미세화되어 있음을 볼 수 있다. Fig.7은 진공분위기 상태의 폴림온도 900~1200℃에서 관찰된 조직사진으로 폴림온도가 높을수록 결정립의 크기는 점차 증가하고 있음을 볼 수 있으며 이것은 Inaba등⁽⁷⁾이 인바소재는 1040℃ 부근의 온도에서 결정립이 성장하며, 1000℃의 폴림온도에서 결정립의 크기가 20~100 μ m, 1100℃의 온도에서 30~150 μ m로, 1200℃의 온도에서 결정립이 더욱 성장한다고 한 결과와 비슷하게 본 실험의 경우에도 폴림온도가 높은 1100℃ 및 1200℃ 폴림재의 결정립은 매우 조대화 되어 있음을 볼

수 있다.

한편 Fig.8은 수소분위기에서 풀림처리한 경우의 조직사진으로 진공분위기에서의 풀림재의 경우와 비슷한 양상을 갖고 있다. 이 결과는 Inaba등⁽⁶⁾이 인바소재를 진공 및 수소분위기에서 풀림처리할 경우 소재에 함유된 Mn, Cr, Ca등의 원소에 의한 표면 석출물의 차이는 나타나지만 동일한 풀림 온도에서의 내부 결정립의 크기는 진공이나 수소분위기에서의 풀림재 모두 비슷하다고 한 결과와 일치함을 알 수 있다.

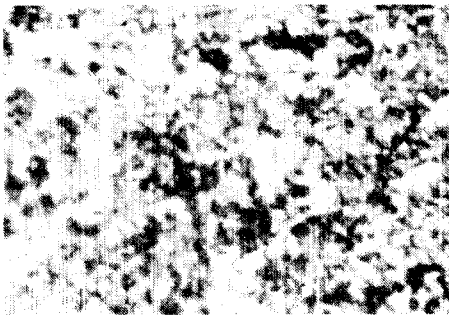


Fig. 6 Microstructure of rolled Invar ($\times 100$)



(a) 900°C



(b) 1000°C



(c) 1100°C



(d) 1200°C

Fig. 7 Microstructures of vacuum annealed Invar($\times 100$)



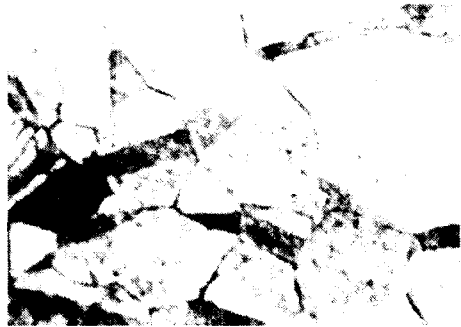
(a) 900°C



(b) 1000°C



(c) 1100°C



(d) 1200°C

Fig. 8 Microstructures of H₂ gas annealed Invar (× 100)

3.2 풀림열처리조건과 경도값의 관계

Fig. 9는 진공 및 수소분위기에서 풀림온도 차이에 의한 인바소재의 경도값의 관계를 나타낸 것이다. 이때 미풀림 인바소재의 마이크로 경도값은 165 HV 0.1정도이나, 풀림온도 900 ~ 1200°C범위의 진공 및 수소분위기에서 풀림처리한 인바소재의 경도값은 140~143 HV 0.1의 값을 나타내고 있다. 이 결과는 경도값에 미치는 진공 및 수소분위기의 영향은 거의 나타나지 않고 또한 900°C 풀림온도에서의 경도값은 미풀림재의 경도값(165 HV 0.1)에 비해 약간 저하했으나, 900°C 이상의 풀림온도에서는 풀림온도의 증가에도 불구하고 경도값의 저하현상이 나타나고 있지 않으며 일정한 값(140~143 HV 0.1)의 범위에서 나타나고 있다.

이 현상은 3.1절에서 검토한 바와같이 열처리후의 조직이 풀림온도의 증가에 따라 결정립이 조대화된 점을 고려하면 결정립의 크기가 클수록 강도나 경도값은 저하한다는 Hall-Patch등의 결과⁽¹⁷⁾와는 일치하지 않고 있다.

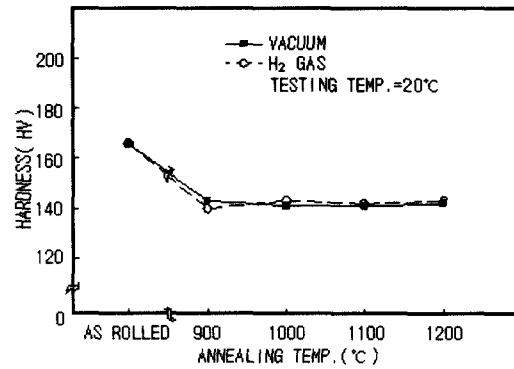


Fig. 9 The relations between micro-vickers hardness and annealing temperatures

3.3 풀림온도와 시험온도에 따른 인장 및 항복 강도의 관계

Fig.10 및 Fig.11은 미풀림재와 각각 진공 및 수소분위기에서 풀림처리시킨 인바소재의 풀림온도와 시험온도에 따른 인장 및 항복강도의 관계를 나타낸 것이다.

이 결과 미풀림재 및 각각의 풀림온도에서 풀림처리한 인바소재의 인장 및 항복강도는 모두 열처리 온도가 높을수록 각각 감소할 뿐만 아니라 이 값들은 시험온도에 따라서도 영향이 크게 나타나고 있다. 먼저 미풀림재와 900°C 진공풀림재의 인장강도를 비교하면 상온에서 900°C풀림재의 인장강도는 43.4kg/mm²으로 미풀림재의 48.0kg/mm²에 비해 약 0.9배의 값을 나타내고 있으나 시험온도가 증가하면 저하정도가 점점 줄어들어 300°C의 시험온도에서 900°C풀림재는 31.0kg/mm²으로 미풀림재의 인장강도와 거의 비슷한 값을 갖는다. 따라서 시험온도가 높은 경우, 인바소재의 인장강도에 미치는 풀림처리의 효과는 크지 않음을 알 수 있다. 한편 항복강도의 경우에는 상온에서 900°C풀림재의 항복강도는 24.9kg/mm²으로 미풀림재의 38.1kg/mm²에 비해 약 0.65배로 인장강도의 경우와는 달리 크게 저하하고 있으며, 저하정도는 시험온도가 증가할수록 점점 크게 나타나서 300°C의 시험온도에서 900°C풀림재는 6.9kg/mm²으로 미풀림재의 25.9kg/mm²에 비해 약 0.27배까지 현저하게 저하하고 있다. 이상과 같은 진공풀림재의 결과는 Fig.11의 수소풀림재에서도 비슷한 경향이 나타나고 있어서 진공 및 수소풀림재 모두 시험온도가 높을수록 항복강

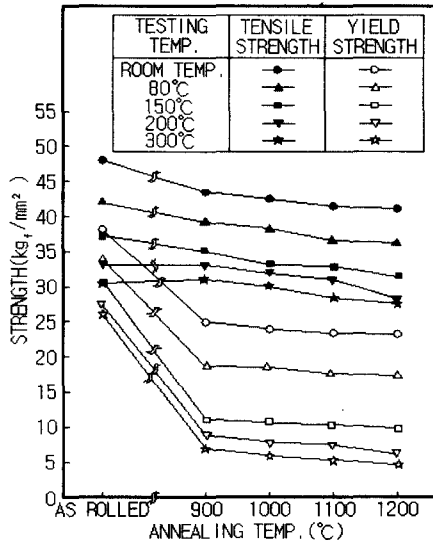


Fig. 10 The relations between strength and annealing temperatures in vacuum atmosphere

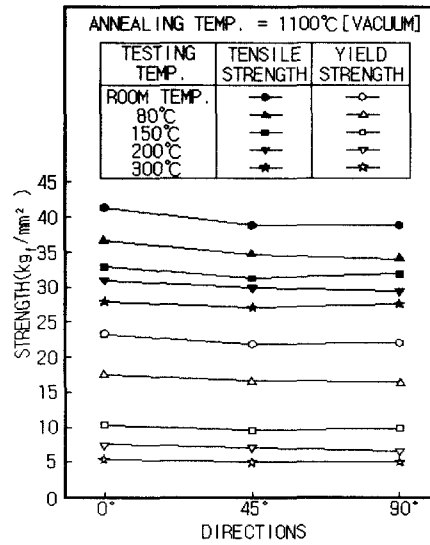


Fig. 12 The relations between strength and test angle to the rolling direction of annealed Invar material

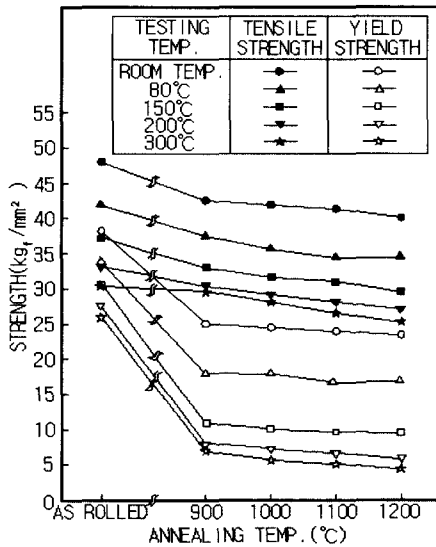


Fig. 11 The relations between strength and annealing temperatures in H₂ gas atmosphere

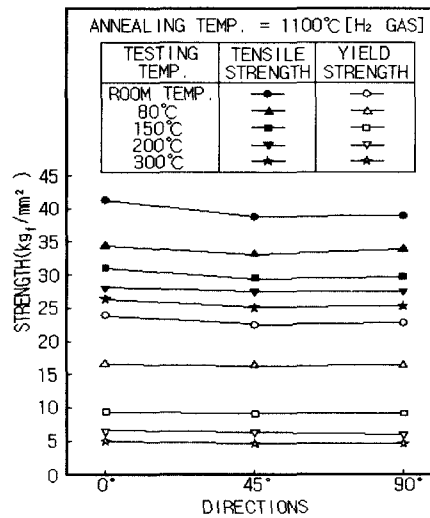


Fig. 13 The relations between strength and test angles to the rolling directions of annealed Invar material

도의 저하에 미치는 풀림처리의 효과는 매우 큼을 알 수 있다.

한편 동일 시험온도에서 진공풀림재의 인장 및 항복강도에 미치는 풀림온도의 영향을 살펴보면,

상온에서 1200°C 풀림재의 인장강도는 41.1kg/mm²으로 900°C 풀림재인 43.4kg/mm²의 약 0.95배, 300°C의 시험온도에서 1200°C 풀림재는 27.5kg/mm²으로 900°C 풀림재인 31.0kg/mm²의 약 0.85배의 값을

나타내고 있으며, 또한 상온에서 1200℃ 풀림재의 항복강도는 23.2 kg/mm²으로 900℃ 풀림재인 24.9 kg/mm²의 약 0.93배, 300℃의 시험온도에서 1200℃ 풀림재는 4.6kg/mm²으로 900℃ 풀림재인 6.9kg/mm²의 약 0.65배를 나타내고 있다. 이상과 같은 진공풀림재의 결과는 Fig.11의 수소풀림재에서도 비슷한 경향을 나타내고 있으며 동일한 시험온도에서 인바소재의 인장 및 항복강도에 미치는 풀림온도 크기의 영향은 진공 및 수소풀림재 모두 풀림온도가 높을수록 인장 및 항복강도 값은 서서히 저하하고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 Nakamura등⁽¹⁸⁾이 Fe-30%Ni 합금재를 800~1100℃의 온도에서 풀림처리한 경우, 풀림조직은 풀림온도가 높을수록 α 상의 체적분율은 20%에서 8%로 감소하고 γ 상의 체적분율은 64%에서 81%로 증가하고 있으며, 풀림온도가 높을수록 상온에서 인장 및 항복강도는 서서히 감소하는 경향을 갖는다고 한 결과와도 일치하고 있다.

한편 Fig.12 및 Fig.13은 각각 1100℃ 진공 및 수소풀림재의 압연방향(0°), 45° 방향(45°) 및 압연 직각방향(90°)에 대하여 시험온도 변화에 따른 인장 및 항복강도를 나타낸 것이다. 이 결과 상온의 시험온도에서 인장강도는 0° 방향에서 41.3~41.4kg/mm², 45° 방향에서 38.8kg/mm², 90° 방향에서 38.9kg/mm²으로 나타나고 있고, 항복강도는 0° 방향에서 23.3~23.9kg/mm², 45° 방향에서 21.9~22.5kg/mm², 90° 방향에서 22.5~22.8kg/mm²의 크기를 갖고 있다. 따라서 1100℃ 풀림온도에서 결정립이 어느 정도 조대화한 풀림인바재도 상온의 시험온도에서는 0° 방향의 인장 및 항복강도가 45° 및 90° 방향의 이들 값보다 약 1.1배정도 크게 나타나고 있지만, 시험온도를 증가시키면 이들 방향성의 영향은 점점 작아짐을 알 수 있다.

3.4 풀림온도와 시험온도에 따른 연신율의 관계

Fig.14 및 Fig.15는 각각 진공 및 수소풀림재의 풀림온도와 시험온도에 따른 연신율의 관계를 나타낸 것이다.

이 결과 상온의 시험온도에서 미풀림 인바재의 연신율은 약 19%의 값을 갖고 있으나 900℃의 진공 및 수소풀림재의 900℃ 온도에서 풀림처리한 인바재의 연신율은 약 32~33.5%로 크게 증가하고 있

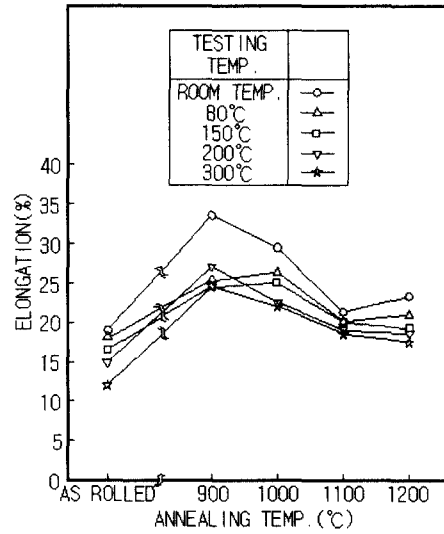


Fig. 14 The relations of elongation for the annealing temperatures in vacuum and testing temperatures

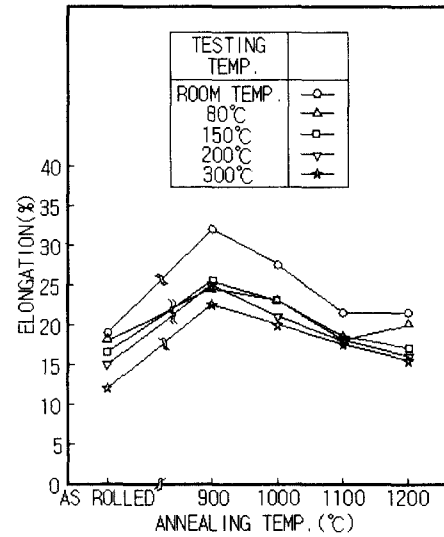


Fig. 15 The relations of elongation for the annealing temperatures in H₂ gas and testing temperatures

다. 그러나 풀림온도가 점점 증가하면 연신율은 오히려 저하하는 경향이 나타나서 1200℃ 진공 및 수소풀림재의 연신율은 약 21.5~23.3%의 값을 갖는다.

이상과 같이 인바소재의 연신율에 대한 상온에서의 결과는 시험온도가 증가하는 경우에도 비슷한 경향이 나타나고 있으나 미풀림재 및 진공, 수소풀림재 모두 시험온도가 증가할수록 연신율은 점점 저하하여 300℃의 시험온도에서 미풀림재의 연신율은 12.0%, 900℃풀림재는 약 22.5~24.5%로 증가하였다가 풀림온도가 높아지면 연신율은 점점 저하하여 1200℃풀림재는 15.5~17.5%의 값을 나타낸다. 따라서 인바재의 경우 연신율은 상온 ~ 300℃의 시험온도 범위에서는 모두 900℃풀림재가 최대의 연신율을 갖는다.

이 결과는 Inaba등^{7, 8)}이 Fe-36%Ni 합금을 진공 상태에서 풀림처리 한 경우, 1000℃의 온도에서는 Mn과 Cr성분이 균일하게 분산되어 석출물이 관찰되지 않지만, 1100℃의 온도에서는 Mn의 일부분이 황화물이나 산화물로 결정입계에서 석출되며, 1200℃의 온도에서는 Ca성분이 지름이 수 μm인 원형의 산화물, 황화물 또는 복합화합물의 석출물로 결정입계 및 결정입내에서도 존재한다고 하였다. 또한 수소 풀림처리한 경우 1000~1100℃의 온도에서는 주로 Mn성분이 결정입계에 산화물로, 1200℃의 온도에서는 주로 Si성분이 산화물로 석출한다고 하였다. 따라서 본 실험에서 사용한 인바소재의 경우 Si, Mn, P, S 등의 원소가 극소량이지만 함유되어 있고 진공 및 수소분위에서 풀림처리시 풀림온도가 높을수록 결정입계등에 다양한 석출물이 존재할 수 있기 때문에 이들 석출물등이 연신율을 저하시키는 것으로 생각된다.

3.5 풀림온도와 시험온도에 따른 강도비의 관계

성형개시 조건인 항복강도와 네킹등 국부적인 변형이 발생하는 성형불안정 개시점인 인장강도와의 비를 고려한 강도비[인장강도/항복강도]는 강도비가 클수록 인장성형성이 우수한 것으로 알려져 있다.¹⁹⁾ 따라서 Fig.16은 미풀림 인바재와 진공 및 수소풀림재의 풀림온도와 시험온도에 따른 강도비를 나타낸 것이다.

이 결과 미풀림 인바재의 강도비는 상온 및 300℃의 시험온도 범위에서 모두 1.2~1.3의 값을 갖는다. 따라서 미풀림 인바재는 3.3절에서 검토한 바와 같이 시험온도가 높을수록 인장 및 항복강도를 각각 저하시킬 수 있지만 시험온도만의 증가에 의

해서는 강도비를 향상 시킬수 없음을 알 수 있다.

한편 진공 및 수소풀림재에 대한 상온 및 150℃의 시험온도 범위에서의 강도비는 상온에서 1.7~1.8, 80℃의 시험온도에서 2.0~2.1, 150℃의 시험온도에서 3.0~3.2로 시험온도가 증가하면 강도비는 점점 증가 되고 있지만, 동일한 시험온도에서는 풀림온도의 크기에 무관하게 강도비가 일정한 값을 갖고 있어 풀림온도 크기에 의한 효과는 나타나지 않는다. 그러나 시험온도가 200℃ 및 300℃인 경우에는 풀림온도가 높을수록 강도비가 점점 증가하는 경향이 나타나고 있으며 특히 시험온도 300℃에서 풀림온도가 1200℃인 경우 진공풀림재의 강도비는 6.0, 수소풀림재는 5.7로 미풀림재의 강도비 1.2~1.3의 약 4.7배까지 크게 증가시킬 수 있어서 시험온도와 함께 풀림온도의 크기에 의한 효과가 나타난다.

따라서 인바소재는 풀림처리와 더불어 200℃이상의 온간온도 범위에서 성형작업을 행하면 인장 및 항복강도를 저하시킴과 동시에 강도비를 증가시켜 인장성형성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

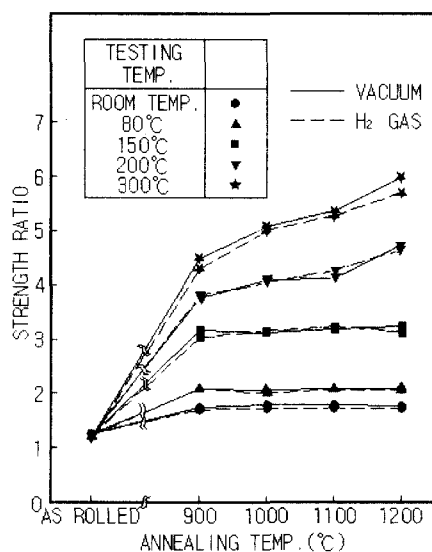


Fig. 16 The relations between strength ratio [tensile strength/yield strength] for the annealing temperatures and testing temperatures

4. 결론

본 연구는 인바소재의 열처리특성 및 시험 온도가 기계적성질에 미치는 영향을 검토하기 위하여 풀림온도, 열처리 분위기등의 풀림열처리 조건을 다양하게 변화시켜 열처리를 한 후, 상온에서 300°C의 시험온도 범위에서 인장실험을 행하였다.

이 결과 얻어진 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 미풀림 인바재의 결정립은 매우 미세하나, 진공 및 수소분위기에서 풀림처리한 인바재의 결정립은 풀림온도가 증가할수록 점차 성장하고 있으며 특히 1100°C 및 1200°C의 풀림온도에서 매우 조대화 되었다.

(2) 미풀림재 및 진공과 수소분위기의 900~1200°C 풀림재의 인장 및 항복강도는 시험온도가 높을수록 각각 저하한다. 그러나 시험온도가 증가할수록 풀림재의 인장강도는 미풀림재의 인장강도와 비슷한 값을 갖는 반면, 풀림재의 항복강도는 미풀림재의 항복강도보다 현저히 저하하는 특징이 나타난다.

(3) 결정립이 조대화한 1100°C 풀림재의 경우 상온의 시험온도에서는 압연방향(0°)의 인장 및 항복강도가 45° 및 90° 방향의 이들 값보다 약간 크게 나타나고 있지만, 시험온도가 증가할수록 이들 방향성의 영향은 점점 작아진다.

(4) 각각의 시험온도에서 900°C 풀림재의 연신율은 미풀림재의 연신율에 비해 크게 증가하고 있으나, 풀림온도가 높아지면 연신율은 점점 저하한다. 또한 시험온도가 증가할수록 미풀림재 및 풀림재의 연신율은 각각 저하한다.

(5) 미풀림재의 강도비는 시험온도의 크기에 무관하게 모두 1.2~1.3의 값을 갖는다. 한편 진공 및 수소풀림재의 강도비는 시험온도가 높을수록 강도비가 증가하지만, 상온, 80°C 및 150°C의 시험온도에서는 풀림온도의 크기에는 무관하게 각각 1.7~1.8, 2.0~2.1 및 3.0~3.1의 일정한 크기를 갖는다. 그러나 시험온도가 200°C 및 300°C인 경우에는 시험온도와 풀림온도가 높을수록 강도비는 점점 증가하며, 300°C의 시험온도에서 1200°C 풀림재의 강도비는 약 5.7~6.0을 나타내고 있어 인바소재의 인장 성형성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

후기

본 연구는 서울산업대학교 교내학술 연구비 지원

원을 받아 수행되었으며, 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

1. M. Matsui, S. Chikazumi, "Analysis of Anomalous Thermal Expansion Coefficient of Fe-Ni Invar Alloys," J. of Physical Society of Japan, Vol. 45, No. 2, pp. 458~464, 1978.
2. W. F. Schlosser et al, "The Temperature and Magnetic Field Dependence of the forced Magnetostriction and Thermal expansion of INVVAR," J. of Phys. Chem. Solids, Vol. 32, pp. 927~938, 1971.
3. M. Nakamura, K. Tsuya, "Effect of heat treatment on structure and mechanical properties of sintered Fe-Ni alloys," Powder Metallurgy, Vol. 26, No. 3, pp. 149~154, 1983.
4. H. Morrow, D. L. Sponseller et al, "The Effects of Molybdenum and Aluminum on the Thermal Expansion Coefficients of Ni-Base Alloys," Metallurgical Transactions, Vol. 6, pp. 477~485, 1975.
5. M. L. Theodore, D. A. Colling et al, "The Determination of small amounts of Sulfur in Fe-Ni Alloys," Transactions of the Metallurgical Society of AIME, Vol. 245, pp. 1823~1824, 1969.
6. M. Inaba et al, "Effect of the Annealing conditions on the Oxidation behavior of Fe-36 Ni Alloys," Applied Surface Science 27, pp. 164~179, 1986.
7. M. Inaba et al, "Surface segregation of impurities on vacuum annealed 36% Ni-Fe alloy," J. of Materials Science Letters 4, pp. 818~821, 1985.
8. M. Inaba et al, "Surface segregation of impurities, manganese and silicon on hydrogen-annealed 36% Ni-Fe alloys," J. of Materials science Letters 5, pp 16~18, 1986.
9. H. Kagawa, S. Chikazumi, "Origin of Effect in Fe-Ni Invar Alloy," J. of Physics Society Japan, Vol. 43, No. 3, pp. 1097-1098, 1977.
10. J. R. C. Guimaraes, J. c. Shyne, "On the Effects of Plastic Deformation on Thermal Stabilization of Austenite in Fe-Ni-C Alloy," Metallurgical

- Transactions Vol. 2, pp. 2063~2065, 1971.
11. M. Inaba, K. Teshima et al, "Development of an Invar Shadow Mask for Color Cathode Ray Tubes," IEEE Transaction on electron devices, Vol. 35, No. 10, pp. 1721~1728, 1988.
 12. N. J. Park et al, "Effects of Texture on the Etching Property of Fe-36%Ni Invar Sheets," Metals and Materials, Vol. 6, No. 1, pp. 51~56, 2000.
 13. K. Nohara et al, "Warm press forming of stainless steel sheets," Proceed. 1st. int., con. on New Manufacturing Technology, chiba, Japan, pp. 553~537, 1990.
 14. T. Ohwue et al, "Temperature dependence of tensile properties and drawability of steel sheets in warm working condition," JSTP, Vol. 28, No. 314, pp. 225~231, 1987.
 15. M. H. Shipton and W. T. Roberts, "Hot deep drawing of Titanium sheet," Materials Science and Technology, Vol. 7, pp. 537~540, 1991.
 16. 원시태, "인바재료의 기계적성질에 미치는 풀림 열처리의 영향," 한국정밀공학회지, 제18권, 제1호, pp. 129~138, 2001.
 17. 이동녕, "재료강도학," 문운당, pp. 208, 1994.
 18. M. Nakamura and K. Txuya, "Effect of phase distribution on mechaninal properties of Fe-Ni heterogeneous alloys, Powder Metallurgy," No. 4, pp. 179~185, 1979.
 19. 최태준, "황동판의 성형성에 미치는 압연제조공정의 영향," 서울산업대 대학원 석사논문, pp. 11, 1996.